

中性子とマイクロ波を利用したコンクリート 水分量計測法の検証

田中 秀樹 泉田 福典[†] 藤田 浩史^{††}

Inspection of Moisture Measurement Method for a Concrete Using Neutron and Microwave

Hideki TANAKA Fukunori IZUMIDA Hiroshi FUJITA

It is well known that strength and durability of concrete are greatly influenced on a moisture in fresh concrete. Though various types of method have been suggested for measuring the moisture in the fresh concrete using each neutron or microwave system, independently, the systematic researches have not be reported. In this study, both neutron and microwave systems wer used, simultaneously, and the moisture level of the fresh concrete were mesured.

Keywords: Fresh Concrete, Moisture, Non-Destructive Measurement, Neutron, Microwave

フレッシュコンクリートの水分量は、コンクリートの強度および耐久性などに大きな影響をおよぼすことはよく知られている。これを計測する手法として、さまざまな方式が提案されており、本研究で実施する中性子ならびにマイクロ波を利用した水分量計測法もその一つである。これまで、個々の方式を用いた報告例は多いが、中性子とマイクロ波を相互に体系づけた研究はなされていない。そこで、同じ配合計画のもとに製作したフレッシュコンクリートに対し、中性子とマイクロ波それぞれの手法で水分量を計測し、相互の適用性について検証した。

キーワード: フレッシュコンクリート、水分量、非破壊計測、中性子、マイクロ波

1 まえがき

フレッシュコンクリートの水分量は、コンクリートの強度および耐久性などに大きな影響をおよぼすことはよく知られている^{(1),(2)}。コンクリート製造工場ならびに打設現場において、フレッシュコンクリートの水分量の定量的な検査が、コンクリート構造物の品質を確保するためには理想的とされる。しかし、フレッシュコンクリートの水分量の計測によく用いられる手法では、計測方法、計測に要する時間、計測精度に問題が残されている。これまでモルタルの水分量を検査する方法については多くの提案⁽³⁾⁻⁽⁷⁾がされきたが、フレッシュコンクリートに対する計測を簡単かつ迅速に計測する方法についての報告は少ない。したがって、現場ではコンクリートにおけ

る水分量を計測できず、作業者の経験に基づいてコンクリートの配合比を調節しているのが現状である。また、コンクリートに対する報告であっても、個々の方式についてのみの提案であり複数の方式を体系づけた事例はないようである。

これまで筆者らは、中性子の水素に対する減速効果を利用したセンサ⁽⁸⁾、ならびに、マイクロ波の誘電率を利用したセンサ⁽⁹⁾を開発し、それぞれ、密封容器内のスケール量、米の水分量の計測へ適用可能であることを実験により明らかにしてきた。本報告では各センサの特徴を踏まえたうえで、各センサのフレッシュコンクリートの水分量計測への適用性について検討を行った。検証方法として、同じ配合計画のもとに製作したフレッシュコンクリートに対し、各センサを用いた水分量の計測実験を行い、両者を比較した。また実験結果より各センサの特徴を明らかにした。

[†] 岩手県工業技術センター, 盛岡市

^{††} 中国生コンクリート(株), 広島市

2 計測原理

2.1 中性子式

計測対象物の外側に、放射線源(以下、線源)と放射線検出器(以下、検出器)を近接させ配置する。線源から放出される中性子は、フレッシュコンクリート中の水との間で相互作用を生じ減速する。検出器は減速した熱中性子を検出し、入射した中性子のエネルギーに比例した電圧パルス信号を発生する。本研究に用いる線源には、微量(3.7MBq以下)の放射性同位元素²⁵²Cfを用い、検出器には熱中性子に感度の高い³He 比例計数管を使用する。

検出器の後段にはマルチ・チャンネル・アナライザ(以下、MCA)を置き、電圧パルスを波高値ごとに分別する。このMCAの分別結果より、後方散乱とフレッシュコンクリートの水分量との相関関係を明らかにし、水分量の推定を可能とする。

2.2 マイクロ波式

2台のダブルリジッド・ホーンアンテナ(EMCO 3115)間に計測対象物を置く。ベクトルネットワークアナライザ(HP 8720D)とホーンアンテナとを接続し、一方のホーンアンテナからマイクロ波を照射し、他方のホーンアンテナで計測対象物からの透過波を受信する。マイクロ波において水の減衰係数は大きく、水分量と透過波のゲインとの間の相関関係を明らかにすることで水分量を推定することが可能である。なお、受信アンテナには送信アンテナからの直達波や反射波など、計測対象物の透過波以外のマイクロ波も受信される。この不要なマイクロ波を除去するため、タイムドメイン計測を用いて透過波のみの計測を行う。

ここで、マイクロ波の外乱や反射波の影響を極力少なくするため、ホーンアンテナおよび計測対象物はカーボン含浸ウレタン電波吸収体で覆われた電波無響室に配置する。

3 水分量計測実験

3.1 使用材料および配合

実験に用いたコンクリート材料は次のとおりである。

- (1) 普通ポルトランドセメント
- (2) 細骨材(川砂)

- (3) 粗骨材(碎石、25mm以下)

本実験では減水剤は使用しない。

コンクリートの配合は、土木学会コンクリート標準示方書に準じ、スランブの範囲12cm、空気量の範囲5%、細骨材率32%を目標値とした。実験で用いた配合比を表1に示す。

表1の水分量は、コンクリート総質量に対する水の質量を百分率で表わしたものである。

3.2 中性子式による実験

3.2.1 実験方法

図1に中性子式の実験構成図を示す。

配合計画では表1のように、水分量を5%から12%となるよう水と粗骨材を調整した。水セメント比は、配合計画において水分量と同様に重要な要因である。そこで、本実験では水セメント比を水分量に対し35%から70%となるように設定した。

コンクリートを入れる容器はポリプロピレン製で、寸法は開口径140mm、底面径113mm、高さ195mmである。検出器には比例計数管を用い、これと線源とを密着させ、コンクリートを入れた容器側面から10mm離れたところに配置した。

検出器からの出力は入射した放射線エネルギーに比

表1 コンクリートの配合比

水分量 (%)	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
5	35	111	318	579	1218
6	40	127			1096
7	45	143			1004
8	50	159			932
9	55	175			871
10	60	191			820
11	65	207			775
12	70	223			735

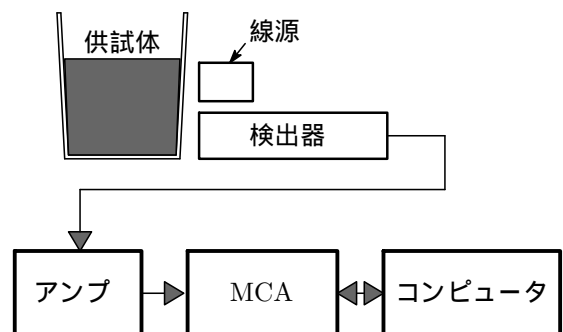


図1 中性子式の実験構成図

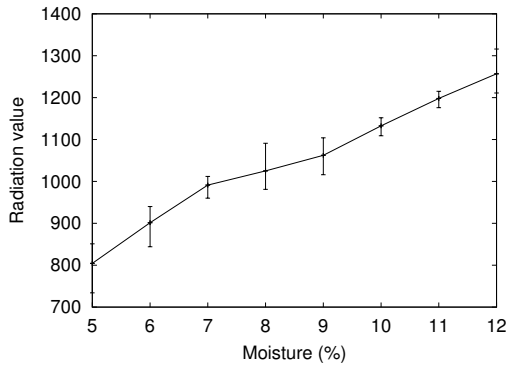


図 2 後方散乱におよぼすコンクリート中の水分量の影響

表 2 中性子式による水分の推定

水分量 (%)	解析データ	水分推定値 (%)	差異
5	804.4	4.5	0.5
6	901.4	6.1	-0.1
7	991.2	7.6	-0.6
8	1025.0	8.1	-0.1
9	1062.2	8.8	0.2
10	1132.6	9.9	0.1
11	1198.0	11.0	0.0
12	1256.8	12.0	0.0

例した電圧値であるが、入力した電圧は MCA においてその値に対応したチャンネルと呼ばれるメモリにその出現回数を蓄積させた。チャンネル数 m の MCA に電圧 E が入力されるとき、チャンネル C は次式で表わされる。

$$C_i = C_i + 1 \quad (1)$$

ここで、 $i = E/m$ である。

検出器で放射線を検出すると、全てのチャンネル (C_0 から C_m まで) にデータが蓄積される。しかし、決まった計測対象物の計測において、特定のチャンネルにデータが蓄積されるという計測特徴が現われることが分かっている。そのため、特定のチャンネルデータを加算し、それを基に認識を行った。この特定チャンネルの範囲を a, b としたとき、解析データ R は次式で表わされる。

表 3 コンクリートの配合

水分量 (%)	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
7	45	229	509	926	1607
9	50	254			1390
11	55	279			829

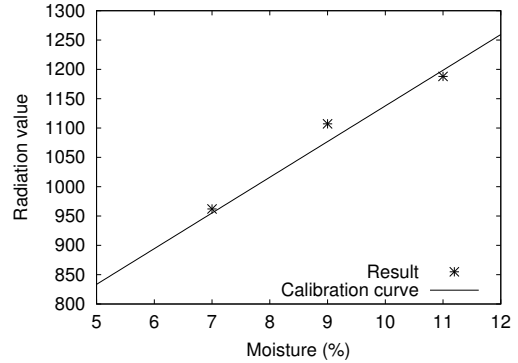


図 3 水分推定に対する評価

$$R = \sum_{i=a}^b C_i \quad (0 \leq a \leq m, 0 \leq b \leq m) \quad (2)$$

本実験において、範囲 a, b はそれぞれ 100, 300 とする。また、放射線検出計数時間は 60 秒間とする。

3.2.2 実験結果

コンクリートの水分量を変化させ後方散乱を計測した結果を図 2 に示す。

水分量が増すにしたがい多少のばらつきはあるが、後方散乱数は 800 から 1250 までほぼ直線的に増大した。

次に、カウント数の水分量への回帰直線を求め、これを校正曲線とする。回帰直線を次式とおく。

$$y = a_0 + a_1 x \quad (3)$$

実験結果から係数 a_0, a_1 を求めると、係数はそれぞれ 60.85, 529.25 であった。また、寄与率は 0.992 となりデータの回帰直線への当てはまりがよいことがわかる。この当てはまりを具体的に数値化するため、放射線数から校正曲線にしたがって水分量を推定した。この結果は表 2 であり、表の差異は配合計画における水分量と推定結果との差を示したものである。表において差異は 1% 以下となり、高い精度で水分量の推定が可能となることが示された。

前述の実験結果を基に算出した校正曲線の評価のため、表 3 に示す配合計画でコンクリートを製作し、本システムを用いた水分量の推定を行った。

前述同様に校正曲線より水分量を推定し、配合計画における水分量との差異を求めた。その結果は図 3 であり、どの水分量も近似直線の近傍に位置し、水分量 7,9,11% に対し差異はそれぞれ -0.1, -0.5, 0.2 であった。これより、本実験で得た校正曲線においてフレッシュコンクリートの水分量計測が可能であることが示された。

ところで、全体的に後方散乱数が少ないのは、線源が半減期を迎え、単位時間に放出する放射線数が減少したためと考えられる。そこで、計測感度の向上として計数時間を増す、また新しい線源を使うことでこの問題が改善されるものと期待される。

3.3 マイクロ波式による実験

3.3.1 実験方法

本実験で用いたフレッシュコンクリートは水を多量に含み、マイクロ波の吸収量が大きいため、できるだけ低い周波数帯域を使い、なおかつ透過型の測定としてマイクロ波が試料内を通過する距離をできるだけ小さくした。

図 4 に本実験の構成図を示す。フレッシュコンクリートをポリプロピレン製容器 (374 × 274 × 62mm) に入れて発泡スチロール製試料台の上に設置した。フレッシュコンクリートの上部と下部にそれぞれホーンアンテナを設置し、ネットワークアナライザによりマイクロ波の吸収量の測定を行った。

マイクロ波は試料下部のアンテナより送信され、試料上部のアンテナで受信される。測定では、ネッ

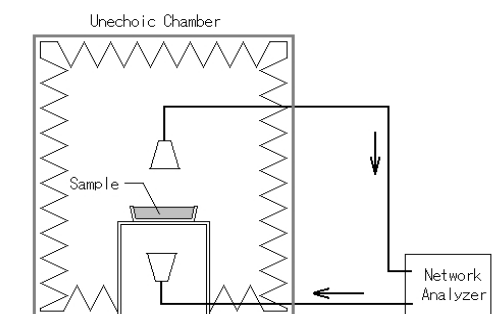


図 4 マイクロ波式の実験構成図

トワークアナライザにより 0.5GHz から 3GHz の周波数帯域で周波数掃引して周波数スペクトルを測定し、これをタイムドメインパルス波形に変換した。このパルス強度によりコンクリートによる吸収量を評価した。

図 4 のような透過型での測定の際は、試料を回り込む信号も受信されるため、レスポンスのスルー校正およびアイソレーション校正の組み合わせでネットワークアナライザの校正を実施した。レスポンスのスルー校正は空の容器を設置して行った。また、12%のフレッシュコンクリートを入れた容器を設置してアイソレーション校正を実施することで、アンテナ間のクロストークを補正した。

なお、試料作成では、配合表の単位量を容器の体積 (4.9L) 当たりの配合量に換算した。

3.3.2 実験結果

図 5 に 5% から 12% のフレッシュコンクリートで測定したタイムドメイン波形を示す。

水分量が減少するにつれ、パルスの強度が大きくなった。パルスの強度 (dB) と水分との関係を図 6 に示す。5% から 11% の水分量では、水分とパルス強度との関係はほぼ直線的であった。一方、12% の水分量は直線から大きく外れた。水分量 12% におけるパルス強度は約 -34dB と非常に小さいため、タイムドメイン変換におけるサイドロープの影響が大きくなったものと考えられる。

5% から 11% の実験結果と式 (3) より回帰直線を求めた結果を図 6 中に示す。また、この回帰直線を用いてパルス強度から推定した水分量、および配合設計上の水分量との差異を表 4 に示す。これより、水

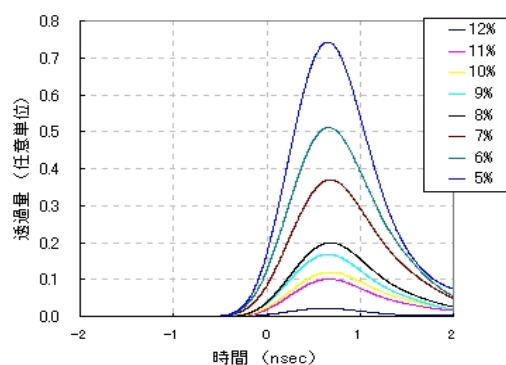


図 5 タイムドメイン波形

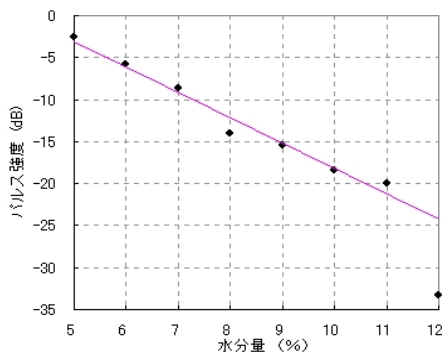


図 6 水分量とパルス強度の関係

表 4 マイクロ波式による水分の推定

水分量 (%)	パルス強度 (dB)	水分推定値 (%)	差異
5	-2.589	4.8	0.2
6	-5.833	5.9	0.1
7	-8.651	6.8	0.2
8	-14.015	8.6	-0.6
9	-15.510	9.1	-0.1
10	-18.431	10.1	-0.1
11	-19.962	10.6	0.4
12	-33.326	15.0	-3.0

分量 11%以下のフレッシュコンクリートでは 1%以下の誤差で水分量を推定できることが示された。

4 考察

中性子、マイクロ波を利用したフレッシュコンクリート水分量計測方法において、本研究により得られた各手法の特徴を次に示す。

中性子による計測法の特徴を述べる。

[中性子式の長所]

- 金属などの遮蔽物のある場所でも計測可能
- 水分量の多い方が精度が良い

[中性子式の短所]

- 計測に時間がかかる (30 秒から 60 秒)
- 線源の半減期が短い (2.5 年)
- 線源・計測装置が高価
- 計測ごとのばらつきが大きい
- 計測装置の小型化が困難

次に、マイクロ波の場合の特徴を述べる。

[マイクロ波式の長所]

- タイムドメイン法により、計測対象物以外からの乱反射をある程度除外可能
- リアルタイム計測が可能
- 安価で小型化の可能性がある

[マイクロ波式の短所]

- 水分量の少ない方が精度が良い
- 計測装置が高価
- 電波法への抵触の問題を有する
- 計測対象物の大きさは波長以上であること
- 計測対象物の厚さは均一であること
- 外乱により計測値がばらつく

低水分量の計測にはマイクロ波式、高水分量には中性子式と、水分量により計測方法を切り替えることで、精度の高い計測が可能であることを示した。

ここで、計測時間に注目すると、入射放射線数を計数する中性子式は計測に時間がかかるためリアルタイム処理には向かない。一方、マイクロ波式は数秒で計測結果が得られる。しかし、インプロセス計測に注目すると、これとは異なる結果となった。中性子式では遮蔽物がある場合でも内容物の水分量を計測でき、計測時間が経過すれば計測結果のデータを出力できる。マイクロ波式では試料の大きさ、厚さ、位置、形状などの影響を受け、また、遮蔽物のある場合には計測できないといった短所がある。このため、コンクリートを形状の等しい容器に移し換え、これを計測しなければならず、インプロセス計測の実施には問題がある。このように、インプロセス計測では、装置が高価であることを除外すれば、遮蔽物のある場合でも計測可能となる中性子式が適していると考えられる。

5 むすび

同配合条件のフレッシュコンクリートの水分量計測を中性子式およびマイクロ波式で実施した。その結果、中性子式において水分量と後方散乱の間に、またマイクロ波式において水分量とタイムドメインパルス強度の間に直線的な強い相関があることを示した。このことから本手法を用いることで、コンクリート製造現場や打設現場においてコンクリートの水分量計測が可能であることを明らかにした。また、計測時間に注目する場合にはマイクロ波式、オンライン計測においては中性子式が適しているとの知見

を得た。

謝 辞 本研究の一部は、中小企業技術開発産学官連携促進事業(中小企業庁補助金)のもとで実施した。記して関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 河野清, 田澤栄一, 門司唱, 新しいコンクリート工学, 朝倉書店, 1987.
- (2) 戸祭邦之, コンクリートの実務, 理工図書, 2000.
- (3) 斎充, 千尋義明, 江守秀次, “フレッシュコンクリートの単位水量計測技術について,” 月刊生コンクリート, vol.15, no.1, pp.37-40, 1996.
- (4) 宮本宏, “小型中性子線源を用いたコンクリート構造物等の検査,” ONSA 先端化学研究会資料, vol.20, pp.5-8, 2000.
- (5) 奥田弥生, 山田明文, “フレッシュコンクリート中の水分の簡易定量,” 電気化学会技術・教育研究論文誌, vol.5, no.1, pp.9-13, 1996.
- (6) 瀬古繁喜, 田村博, 鈴木一雄, 熊原義文, “Ri 水分計を用いたポンプ配管中のコンクリートの水量連続モニタリング,” コンクリート工学年次論文報告集, vol.20, no.1, pp.125-130, 1998.
- (7) 鬼頭昌之, 小河洋夫, 田代利明, 中垣一宏, “マイクロ波式オフライン水分計のフレッシュコンクリート単位水量管理への適用,” コンクリート工学年次論文報告集, vol.20, no.1, pp.119-124, 1998.
- (8) 田中秀樹, “光切断法による細管内面の損傷計測(第2報),” 広島市工業技術センター年報, vol.14, pp.64-70, 2000.
- (9) 泉田福典, 大坊真洋, 川又憲, “マイクロ波を用いた米の水分量測定,” 岩手県工業技術センター研究報告, vol.8, pp.89-92, 2001.